

博士学位論文審査要旨

2014年2月17日

論文題目： Coding and Decoding for Multiuser Communication Systems
(多端子通信システムにおける符号化および復号の研究)

学位申請者： 路 姍

審査委員：

主 査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	程 俊
副 査：	同志社大学	名誉教授	渡辺 陽一郎
副 査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	渡邊 芳英

要 旨：

本論文は、多端子通信路に対するマルチユーザ符号化および復号の研究成果をまとめたものである。多端子通信路のモデルの中には、複数の入力端子と1つの出力端子をもつ多重接続加算通信路や双方向中継通信路等がある。本研究では、多重接続加算通信路において、複数ユーザの稼働状態を識別するための誤り訂正可能なシグネチャ符号の一般的な構成法を解明する。また、双方向中継通信路では、中継者での復号法を提案する。

本研究では、雑音の影響を受けた多重接続加算通信路のシグネチャ符号を一般的に構成する方法を明らかにする。雑音の影響を受けた多重接続通信路に対して、2元符号は勿論のこと、2元以上の符号で誤り訂正可能なシグネチャ符号の一般的な構成法を提案している。

本論文で構築するシグネチャ符号の構成法の基本となる考え方は、既知の低い性能の符号から高い性能の符号を構築することである。符号の一般的な構成として、低い性能のシグネチャ行列 A と差分行列 $D = D^+ - D^-$ が与め与えられるとき、アダマール行列の1行目のすべての要素+1を行列 A に置き換え、その他の行の要素+1を D^+ 、-1を D^- に置き換える。得られた行列の行の集合は、高い性能の誤り訂正可能なシグネチャ符号であることを代数的に証明した。

誤り訂正可能なシグネチャ符号の構成法は、次の特徴を持つ。(i) 開発するシグネチャ符号は、誤り訂正能力が高い。(ii) 行列 A に対応するシグネチャ符号のパラメータ (符号長, 誤り訂正能力, ユーザ数, 次元) は任意である。(iii) 差分行列の行数はシグネチャ行列 A の行数より大きい場合、アダマール行列の位数の増大に伴い、全伝送率が高まっていく。こうして、得られる誤り訂正可能なシグネチャ符号は、これまでに知られている誤り訂正可能なシグネチャ符号より、全伝送率の高いものになる。

次に、双方向中継通信路がガウス型雑音の妨害を受けた場合に、中継者での復号法について論じる。両ユーザが同じターボ符号を使用する場合、多重接続通信フェーズにおける中継者の低演算量な復号法を提案している。復号に用いていた従来の加算トレリス線図で、復号の計算上等価な相互対称状態同士を合併することで、状態数およびエッジ数の少ない簡略化加算トレリス線図を構成し、復号の低演算量化を実現する。提案法は、加算トレリス線図を用いた従来の復号法と比べ、同等の復号精度が得られるものの、演算量は約半分に低減できる。

以上、本研究では、多重接続加算通信路については、ユーザの稼働状態を識別するための誤り訂正可能なシグネチャ符号の構成法を数学的に解明し、シグネチャ符号の理論的に一般性のある符号化法を提案した。双方向中継通信路については、復号の低演算量の特徴により通信システムへの応用が期待される。これらの成果は、多端子通信システムにおけるマルチユーザ符号化および復号に関する理論的かつ実用的な研究であり、この分野の発展に多大なる貢献をなすものである。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2014年2月17日

論文題目： Coding and Decoding for Multiuser Communication Systems
(多端子通信システムにおける符号化および復号の研究)

学位申請者： 路 姍

審査委員：

主 査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	程 俊
副 査：	同志社大学	名誉教授	渡辺 陽一郎
副 査：	同志社大学大学院理工学研究科	教授	渡邊 芳英

要 旨：

本論文提出者は、2010年4月より本学大学院理工学研究科情報工学専攻博士後期課程に在籍し、各年度において優れた研究成果を挙げている。また、日本語に関しては語学試験に合格し、英語に関しては国際学会で論文を発表しているため、十分な語学力を有していることが認められる。

本論文の主たる内容は、IEICE Trans. Commun., Vol.E96-B, No.1 および IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E96-A, No.12 に掲載され、十分な評価を得ている。

2014年1月11日午後1時より約1時間40分にわたって提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開催され、種々の質疑討論が行われたが、論文提出者の説明により十分な理解が得られた。

さらに、講演会終了後、審査委員により論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、十分な学力を有することが確認できた。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： Coding and Decoding for Multiuser Communication Systems
(多端子通信システムにおける符号化および復号の研究)

氏 名： 路 姍

要 旨：

本論文は、多端子通信路に対するマルチユーザ符号化および復号の研究成果をまとめたものである。多端子通信路のモデルの中には、複数の入力端子と1つの出力端子をもつ多重接続加算通信路 (multiple-access adder channel) や双方向中継通信路 (two-way relay channel) 等がある。本研究では、多重接続加算通信路による情報伝送において、複数ユーザの稼働状態を識別するための誤り訂正可能なシグネチャ符号の構成を論ずる。これまでに考案されているシグネチャ符号と同等の符号長および誤り訂正能力のものと比べて、全伝送率の高いシグネチャ符号の一般的な構成法を解明する。また、双方向中継通信路では、2ユーザターボ符号に対する復号の演算量を低減させる復号法を提案する。加法性白色ガウス雑音環境下では復号性能を劣化することなく、レイリーフェージング環境下では僅かな劣化にとどめながら、復号の演算量を約半分程度に低減することができる。本論文は、多重接続加算通信路については、符号化法の一般化されたアプローチを与えるもので、理論の観点から重要であり、双方向中継通信路については、復号の低演算量の特徴により通信システムへの応用が期待される。

本論文は7章から構成される。

第1章は、論文の導入である。多重接続加算通信路、およびに双方向中継通信路に対する符号化および復号に関する研究概要を述べる。さらに、本論文での提案法の新規性および有効性について概括する。

第2章では、多重接続加算通信路において、ユーザの稼働状態を識別するための誤り訂正可能なシグネチャ符号の基礎について述べる。 T ユーザの多重接続加算通信路には、 T 個の入力端子があり、その各々に符号器が接続されている。各符号器からの送信シンボルはお互いに同期をとって桁毎に加算され、共有する通信路に送り込まれる。通信路の出力側には共通の復号器が接続されている。この通信路が雑音の妨害を受けている場合、通信が正しくなされているとは限られない。 T 個のユーザは、通信路に雑音がないときは、復号器で一意に復号できるように、また、通信路に雑音があるときは、誤り検出、または、誤り訂正できるように構成されなければならない。

本研究では、マルチユーザ符号の一種であるシグネチャ符号の構成について述べる。 T 個の長さ n の非負整数のベクトル (符号語) $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_T$ の集合は、 2^T 通りの和 $b_1\mathbf{x}_1 + b_2\mathbf{x}_2 + \dots + b_T\mathbf{x}_T$ 、 $b_i \in \{0, 1\}$ 、が異なるならば、シグネチャ符号と呼ぶ。シグネチャ符号の符号語の任意の組合せの和を調べるにより、どのユーザの符号語が和の中に含まれているかが見分けられる。よって、多重接続加算通信路にシグネチャ符号を適用すると、ユーザの稼働状態 (送信または休眠) を識別することができる。すなわち、各ユーザにシグネチャ符号の1つの符号語に割り当てて、識別されたいユーザが、その符号語を送信し、休眠状態のユーザが送信しない。受信側では、符号語

の和を受信し、送信したユーザの稼働状態を識別することができる。さらに、通信路に雑音があるとき、 δ 復号可能、つまり、誤り訂正可能なシグネチャ符号の構成が必要となる。 δ が1のとき、一意復号可能であるという。また、シグネチャ符号の符号語を行ベクトルにした行列をシグネチャ行列と呼ぶ。

シグネチャ符号は、ここまで整数論に基づく研究が多い。これらの研究は、一意復号可能に限られている。通信路に雑音のある多重接続通信路に適用するため、誤り訂正可能なシグネチャ符号が必要である。

第3章では、誤り訂正可能なシグネチャ符号を再帰的な手法で構成することについて述べる。符号長 n とユーザ数 T のシグネチャ行列を与えると、符号長 $2n+1$ とユーザ数 $2T+1$ のシグネチャ行列を得ることができる。このような再帰的な構造を用いて、自明である符号長1の k 元一意復号可能なシグネチャ符号から、符号長 2^l-1 の 2^l -復号可能なシグネチャ符号を得る。復号により、通信路雑音より生じる誤りを訂正し、各ユーザの稼働状態を識別することができる。

しかし、符号長とユーザ数は、再帰的な構造により同等な倍率増加するため、全伝送率が最初の符号長1のシグネチャ符号と等しい。より高性能の高い全伝送率の誤り訂正可能なシグネチャ符号の構成が望まれる。

第4章は、本論文のシグネチャ符号研究の中心をなす部分で、雑音の影響を受けた多重接続加算通信路のシグネチャ符号を一般的に構成する方法を明らかにする。雑音の影響を受けた多重接続通信路に対して、2元符号は勿論のこと、2元以上の符号で誤り訂正可能なシグネチャ符号の一般的な構成法を提案している。

本論文で構築するシグネチャ符号の構成法の基本となる考え方は、既知の低い性能の符号から高い性能の符号を構築することである。符号の一般的な構成として、低い性能のシグネチャ行列 A と差分行列 $D = D^+ - D^-$ が与えられるとき、アダマール行列の1行目のすべての要素+1を行列 A に置き換え、その他の行の要素+1を D^+ 、-1を D^- に置き換える。得られた行列の行の集合は、高い性能の誤り訂正可能なシグネチャ符号であることを代数的に証明した。

誤り訂正可能なシグネチャ符号の構成法は、第3章の構成法を拡張したものである。(i) 開発するシグネチャ符号は、誤り訂正能力が高い。(ii) 行列 A に対応するシグネチャ符号のパラメータ(符号長、誤り訂正能力、ユーザ数、次元)は任意である。(iii) 差分行列の行数はシグネチャ行列 A の行数より大きい場合、アダマール行列の位数の増大に伴い、全伝送率が増えていく。こうして、得られる誤り訂正可能なシグネチャ符号は、第3章で構成された、すなわち、これまでに知られている誤り訂正可能なシグネチャ符号より、全伝送率の高いものになる。

第4章の後半部分では、章の前半部分で述べた構成法で必要な低水準のシグネチャ符号の構成法について述べている。前半で提案する構成法では低水準の符号のパラメータも任意設定できるので、元の個数と2元の場合の符号長を任意に設定できる一意復号可能なシグネチャ行列と同じ列数の差分行列の新たな構成法を提案している。これらの符号を章の前半部分で述べた符号構成法に適用することによって、これまでに知られている符号より、全伝送率の高いシグネチャ符号を構成することに成功している。

第5章、第6章では、論文の後半部分であり、双方向中継通信路に対する中継者での復号に関する研究である。

第5章は、双方向中継通信路がガウス型雑音の妨害を受けた場合に、中継者での復号法について論じる。双方向中継通信路では、2つのユーザが、中継者を介して、情報交換を行う。2つのタイムスロットで双方の情報交換を完了する。1つのタイムスロットで両ユーザが独立なビット

列を同時に送信する。中継者は、ガウス雑音の妨害を受けたそれらのビット列の和を受信し、両ユーザのビット列の排他的論理和を推定する。これは、2 ユーザの多重接続通信フェーズと呼ばれる。2 つ目のタイムスロットで、中継者は、推定した両ビット列の排他的論理和を両ユーザに放送する。これは、放送フェーズと呼ばれる。両ユーザはそれぞれ中継者の送信ビット列を推定し、元の送信したビット列との排他的論理和を計算する。よって、相手のビット列を推定できて、双方の情報交換を行う。

本論文で、両ユーザが同じターボ符号を使用する場合、多重接続通信フェーズにおける中継者の低演算量な復号法を提案している。復号に用いていた従来の加算トレリス線図で、復号の計算上等価な相互対称状態同士を合併することで、状態数・エッジ数の少ない簡略化加算トレリス線図を構成し、復号の低演算量化を実現する。提案法は、加算トレリス線図を用いた従来の復号法と比べ、同等の復号精度が得るものの、演算量がやや半分に低減できる。

第6章は、前章の続きで、双方向中継通信路がレイリーフェージングの妨害を受けた場合、中継者での復号法について述べる。無線通信では送受信間の伝送には電波を用いる。電波の反射や回折および移動ユーザの移動によって、受信電圧の変動が起こる。これがフェージングである。この受信電圧の変動分布がレイリー分布となるためこのフェージングはレイリーフェージングと呼ばれる。双方向中継通信では、2 ユーザ多重接続通信フェーズにおいて、各ユーザから中継者へのフェージング通信路係数が異なるため、レイリーフェージング環境下において、新たな復号法を検討する必要となる。

本章では、復号の計算量低減のため、第5章で提案した簡易化加算トレリス線図をそのまま適用する。上に述べた2 ユーザのフェージング通信路係数のペアとそのスワップペアを区別するため、簡易化加算トレリス線図に該当エッジの遷移確率を近似で計算する。具体的に、通信路係数ペアとそのスワップペアをそれぞれ用いて遷移確率を計算し、そのなかから大きい方を該当エッジの遷移確率にする。計算機シミュレーションで提案法の有効性を評価する。提案法は、従来の加算トレリス線図を用いた復号法より、復号精度で僅かな劣化にとどめながら、演算量を約半分程度に低減できたことが分かった。

第7章は、論文のまとめである。多重接続加算通信路については、ユーザの稼働状態を識別するための誤り訂正可能なシグネチャ符号の構成法を代数的に解明した。符号構成法に基づいて作られるシグネチャ符号は、全伝送率が向上するとの意味で、多重接続加算通信路の符号化問題において理論的な観点から重要である。双方向中継通信路においては、提案した復号法が低演算量の特徴により通信システムへの応用が期待される。